

Tentti 9.03.2015, kello 16 ... 19, sali S4

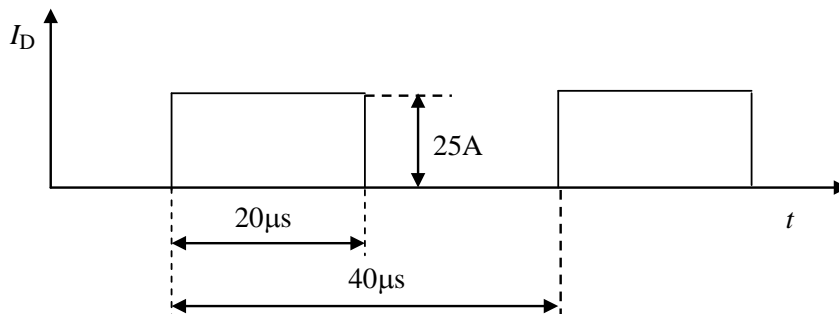
## Papereihin

- sukunimi ja etunimet
- opiskelijanumero
- koulutusohjelma.

## Tentissä sallitut apuvälineet

- kynät, kumit jne.
- taskulaskin
- lukion kaavakokoelma tms. + Laplace taulut

1. Selvitä lyhyesti (max. 2...4 lausetta + mahdollinen kuva), mitä seuraavilla termeillä tarkoitetaan
  - Float zone -menetelmä
  - muutoslämpövastuskäyrä
  - SOA
  - heat-pipe
  - kaksoiskerroskondensaattori.
2. Esittele IGBT:n rakenne, toimintaperiaate ja ominaisuudet.
3. Minkälaisia kondensaattoreita käytetään tehoelektroniikassa? Mitkä ovat niiden ominaisuudet?
4. Määrää CMF20120D SiC-MOSFET:in vaatiman jäähdytyslementin lämpövastus, kun fetin virta on oheisen kuvan mukainen. Hilan jännite on johtotilassa + 20 V ja johtamattomassa tilassa - 2 V. Hilaohjaimen sisäinen resistanssi on 6,8 Ω. Fetin yli oleva jännite on päällekytkennän aikana 600 V ja katkaisun aikana 800 V. Jäähdytysilman lämpötila on 45 °C.



5. Tasavirran suodatukseen aiotaan käyttää kuristinta, jonka ferriittisydämenä on kahdesta E55/28/21 puolikkaasta koostuva E55/55/21. Kuristimen keskimääräinen virta on 44 A ja virran aaltoilun suuruus on 2,2 A huipusta huippuun. Haluttu induktanssi on vähintään 14 μH. Määritä oheisen datalehden ja viimeisellä sivulla olevan käyrästä sekä kaavojen avulla tarvittava käämityksen kierrosmäärä ja sydämen ilmaväli. Laske lopuksi näitä vastaava sydämen maksimivuontiheys  $B_{\max} = \phi_{\max}/A_e$ .



# CMF20120D-Silicon Carbide Power MOSFET

## Z-FET™ MOSFET

N-Channel Enhancement Mode

$V_{DS}$	= 1200 V
$R_{DS(on)}$	= 80 mΩ
$I_{D(MAX)}@T_c=25^\circ C$	= 33 A

### Features

- Industry Leading  $R_{DS(on)}$
- High Speed Switching
- Low Capacitances
- Easy to Parallel
- Simple to Drive
- Pb-Free Plating, RoHS Compliant, Halogen Free

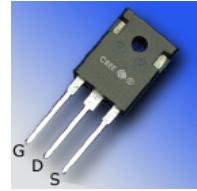
### Benefits

- Higher System Efficiency
- Reduced Cooling Requirements
- Avalanche Ruggedness
- Increased System Switching Frequency

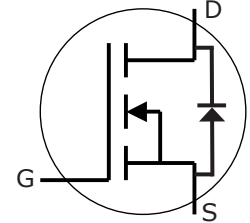
### Applications

- Solar Inverters
- High Voltage DC/DC Converters
- Motor Drives

### Package



TO-247-3



Part Number	Package
CMF20120D	TO-247-3

### Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Value	Unit	Test Conditions	Note
$I_D$	Continuous Drain Current	33	A	$V_{GS}@20V, T_C = 25^\circ C$	
		17		$V_{GS}@20V, T_C = 100^\circ C$	
$I_{Dpulse}$	Pulsed Drain Current	78	A	Pulse width $t_p$ limited by $T_{jmax}$ $T_C = 25^\circ C$	
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy	2.2	J	$I_D = 20A, V_{DD} = 50 V,$ $L = 9.5 mH$	
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy	1.5	J	$t_{AR}$ limited by $T_{jmax}$	
$I_{AR}$	Repetitive Avalanche Current	20	A	$I_D = 20A, V_{DD} = 50 V, L = 3 mH$ $t_{AR}$ limited by $T_{jmax}$	
$V_{GS}$	Gate Source Voltage	-5/+25	V		
$P_{tot}$	Power Dissipation	150	W	$T_C=25^\circ C$	
$T_J, T_{stg}$	Operating Junction and Storage Temperature	-55 to +125	°C		
$T_L$	Solder Temperature	260	°C	1.6mm (0.063") from case for 10s	
$M_d$	Mounting Torque	1	Nm lbf-in	M3 or 6-32 screw	
		8.8			



## Electrical Characteristics

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions	Note
$V_{(BR)DSS}$	Drain-Source Breakdown Voltage	1200			V	$V_{GS} = 0V, I_D = 100\mu A$	
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage		2.5	4	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1mA, T_J = 25^\circ C$	1
			1.8			$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1mA, T_J = 125^\circ C$	
$I_{DSS}$	Zero Gate Voltage Drain Current		1	100	$\mu A$	$V_{DS} = 1200V, V_{GS} = 0V, T_J = 25^\circ C$	
			10	250		$V_{DS} = 1200V, V_{GS} = 0V, T_J = 125^\circ C$	
$I_{GSS}$	Gate-Source Leakage Current			250	nA	$V_{GS} = 20V, V_{DS} = 0V$	
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On-State Resistance		80	110	m $\Omega$	$V_{GS} = 20V, I_D = 20A, T_J = 25^\circ C$	
			95	130		$V_{GS} = 20V, I_D = 20A, T_J = 125^\circ C$	
$g_{fs}$	Transconductance		7.3		S	$V_{DS} = 20V, I_{DS} = 20A, T_J = 25^\circ C$	fig. 3
			6.8			$V_{DS} = 20V, I_{DS} = 20A, T_J = 125^\circ C$	
$C_{iss}$	Input Capacitance		1915		pF	$V_{GS} = 0V$	fig. 5
$C_{oss}$	Output Capacitance		120			$V_{DS} = 800V$	
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance		13			$f = 1MHz$ $V_{AC} = 25mV$	
$t_{d(on)i}$	Turn-On Delay Time		17.2		ns	$V_{DD} = 800V$ $V_{GS} = -2/20V$ $I_D = 20A$ $R_G = 6.8\Omega$ $L = 856\mu H$ Per JEDEC24 Page 27	fig. 12
$t_r$	Rise Time		13.6				
$t_{d(off)i}$	Turn-Off Delay Time		62				
$t_{fi}$	Fall Time		35.6				
$E_{ON}$	Turn-On Switching Loss	(25°C) (125°C)	530 422		$\mu J$		
$E_{Off}$	Turn-Off Switching Loss	(25°C) (125°C)	320 329		$\mu J$		
$R_G$	Internal Gate Resistance		5		$\Omega$	$V_{GS} = 0V, f = 1MHz, V_{AC} = 25mV$	

**NOTES:** 1. The recommended on-state  $V_{GS}$  is +20V and the recommended off-state  $V_{GS}$  is between -2V and -5V

## Reverse Diode Characteristics

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions	Note
$V_{sd}$	Diode Forward Voltage	3.5		V	$V_{GS} = -5V, I_F = 10A, T_J = 25^\circ C$	
		3.1			$V_{GS} = -2V, I_F = 10A, T_J = 25^\circ C$	
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	220		ns	$V_{GS} = -5V, I_F = 20A, T_J = 25^\circ C$ $V_R = 800V,$ $di_F/dt = 100A/\mu s$	fig. 13,14
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	142		nC		
$I_{rrm}$	Peak Reverse Recovery Current	2.3		A		

## Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions	Note
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance from Junction to Case	0.58	0.7	$^\circ C/W$		fig. 6
$R_{\theta CS}$	Case to Sink, w/ Thermal Compound	0.25				
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance From Junction to Ambient		40			

## Gate Charge Characteristics

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions	Note
$Q_{gs}$	Gate to Source Charge	23.8		nC	$V_{DD} = 800V$ $I_D = 20A$ $V_{GS} = -2/20V$ Per JEDEC24-2	fig.9
$Q_{gd}$	Gate to Drain Charge	43.1				
$Q_g$	Gate Charge Total	90.8				

## Typical Performance

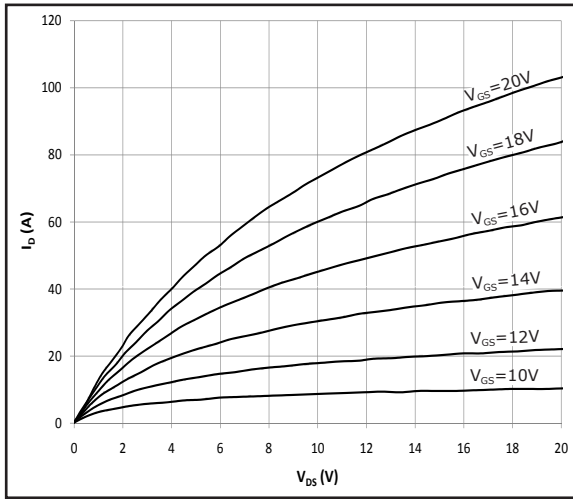


Fig 1. Typical Output Characteristics  $T_j = 25^\circ\text{C}$

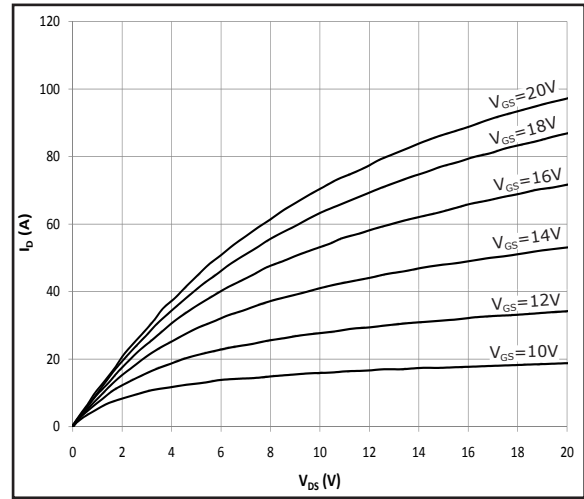


Fig 2. Typical Output Characteristics  $T_j = 125^\circ\text{C}$

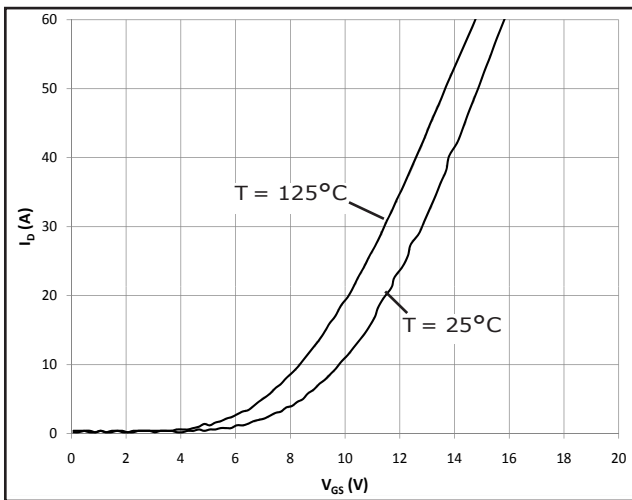


Figure 3. Typical Transfer Characteristics

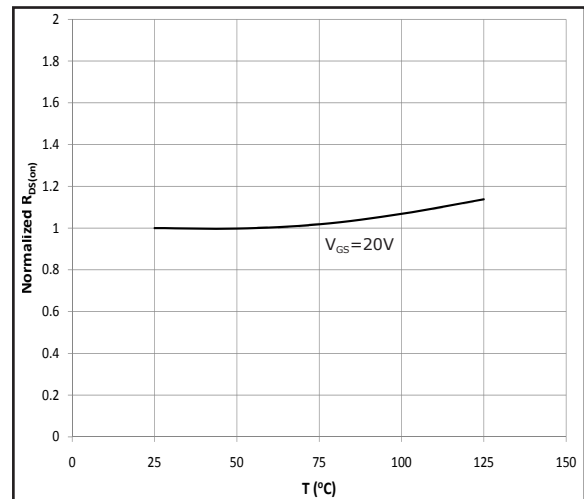


Fig 4. Normalized On-Resistance vs. Temperature

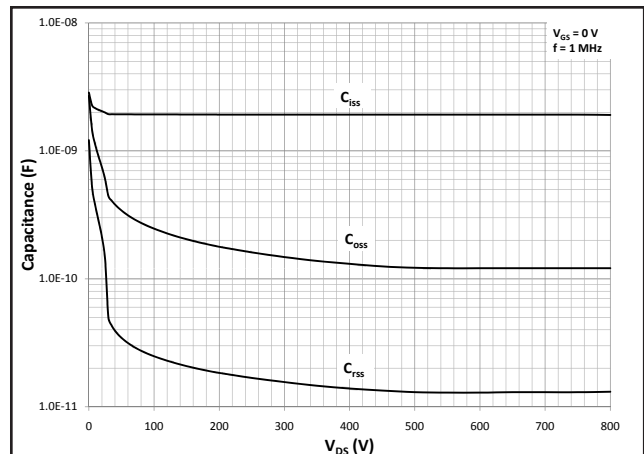
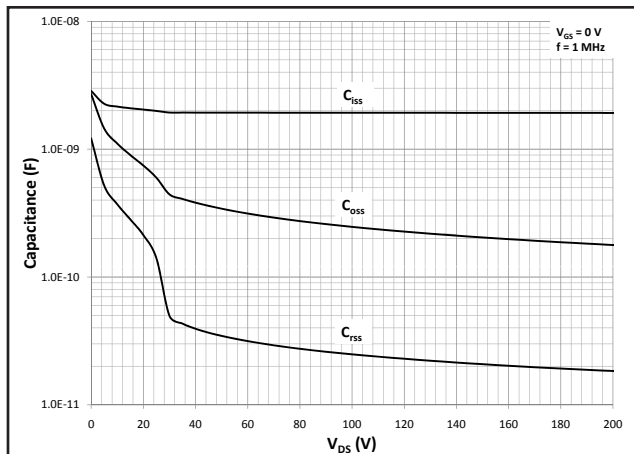


Fig 5A and 5B. Typical Capacitance vs. Drain – Source Voltage

# Typical Performance

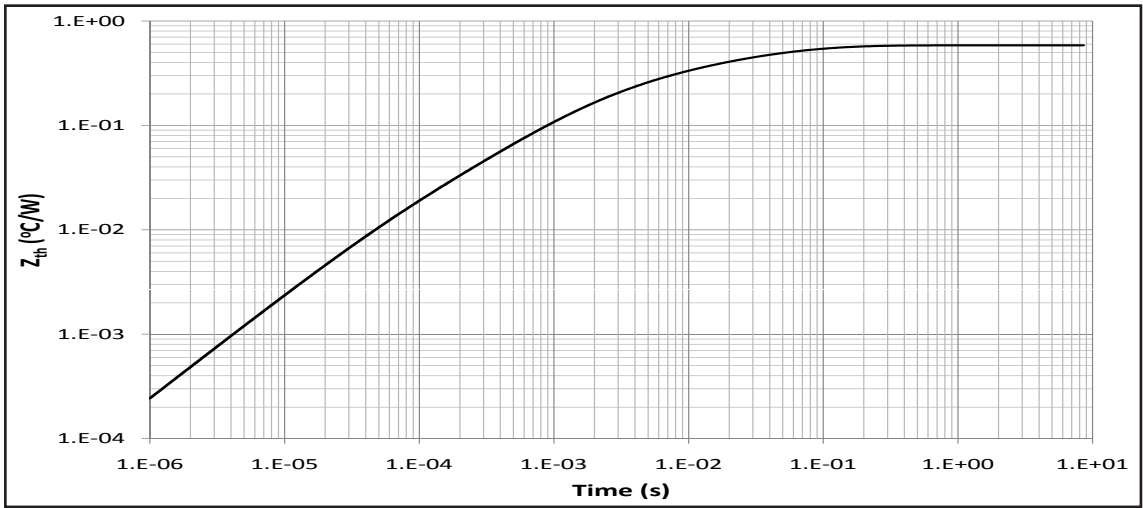


Fig 6. Transient Thermal Impedance, Junction - Case

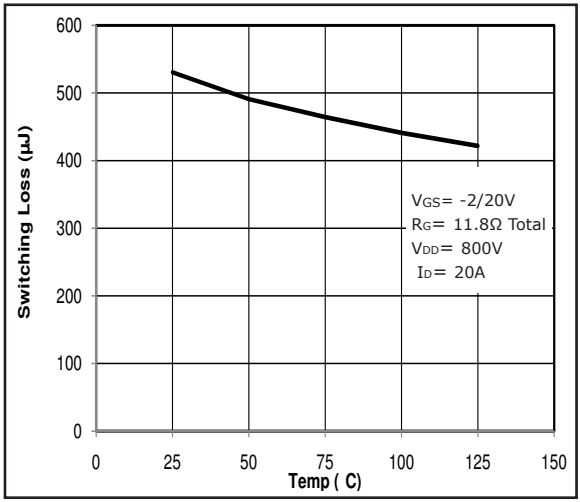


Fig 7. Inductive Switching Energy(Turn-on) vs. T

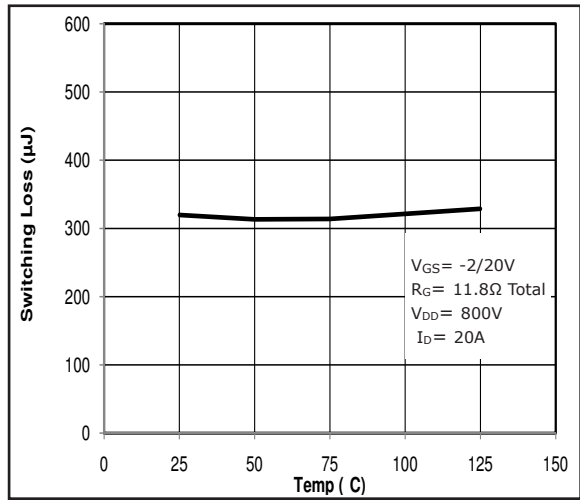


Fig 8. Inductive Switching Energy(Turn-off) vs. T

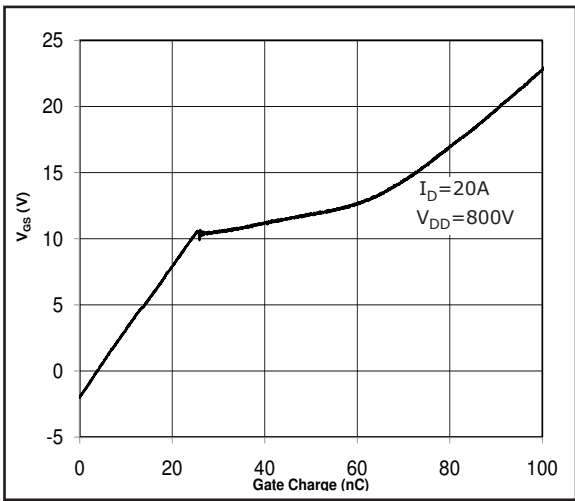


Fig 9. Typical Gate Charge Characteristics @ 25°C

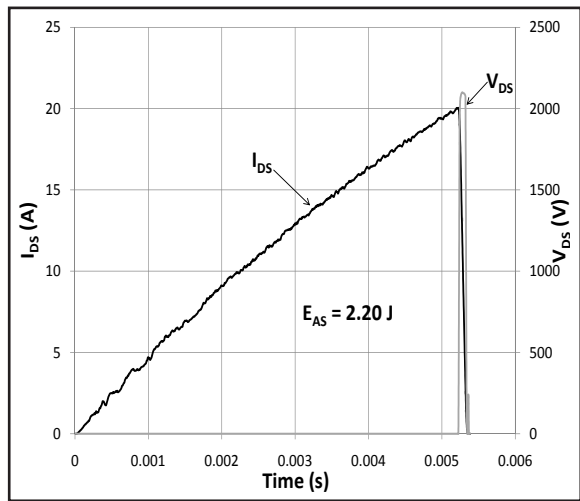


Fig 10. Typical Avalanche Waveform

# Clamped Inductive Switch Testing Fixture

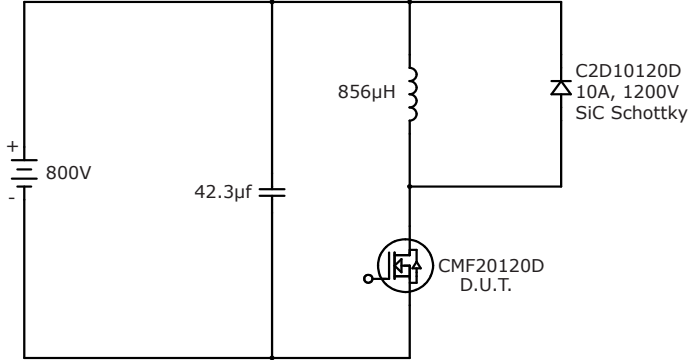


Fig 11. Switching Waveform Test Circuit

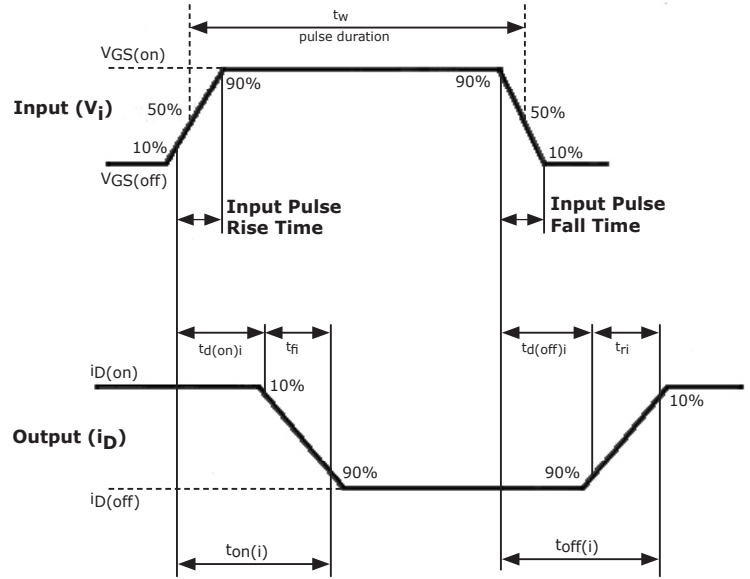


Fig 12. Switching Test Waveform Times

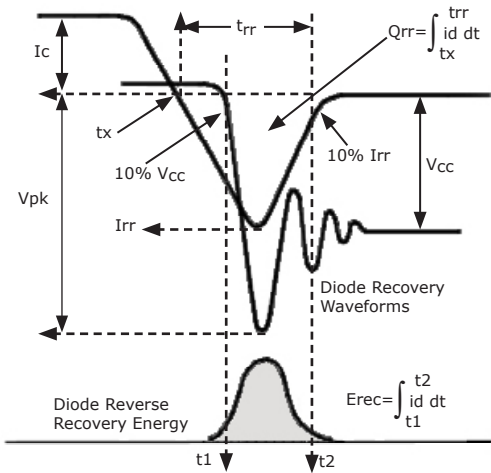


Fig 13. Body Diode Recovery Waveform

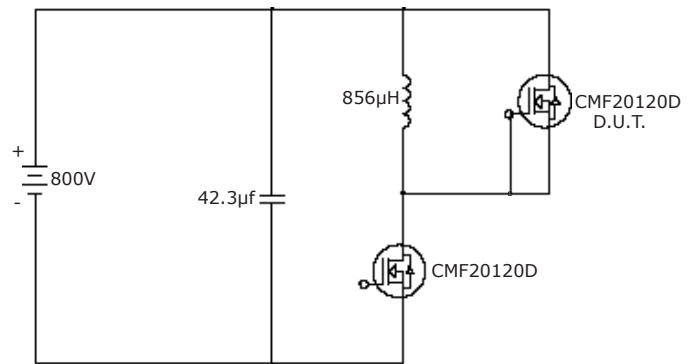


Fig 14. Body Diode Recovery Test

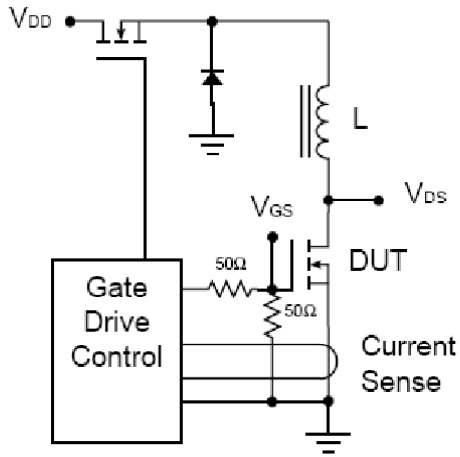
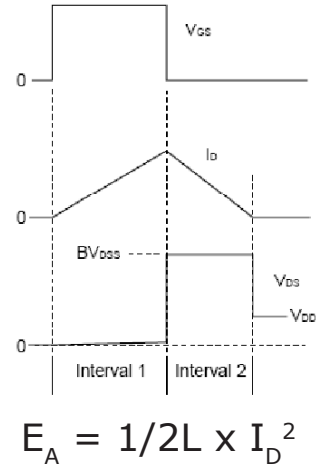


Fig 15. Avalanche Test Circuit

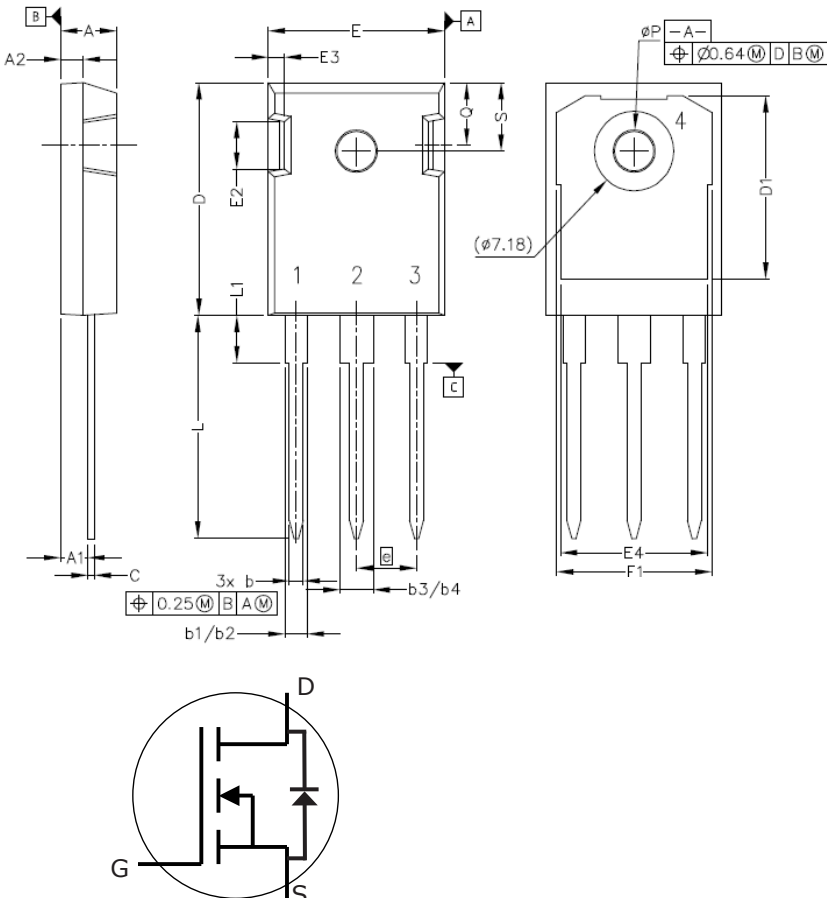


$$E_A = 1/2L \times I_D^2$$

Fig 16. Theoretical Avalanche Waveform

## Package Dimensions

Package TO-247-3



POS	Inches		Millimeters	
	Min	Max	Min	Max
A	.190	.205	4.83	5.21
A1	.090	.100	2.29	2.54
A2	.075	.085	1.91	2.16
b	.042	.052	1.07	1.33
b1	.075	.095	1.91	2.41
b2	.075	.085	1.91	2.16
b3	.113	.133	2.87	3.38
b4	.113	.123	2.87	3.13
c	.022	.027	0.55	0.68
D	.819	.831	20.80	21.10
D1	.640	.695	16.25	17.65
D2	.037	.049	0.95	1.25
E	.620	.635	15.75	16.13
E1	.516	.557	13.10	14.15
E2	.145	.201	3.68	5.10
E3	.039	.075	1.00	1.90
E4	.487	.529	12.38	13.43
e	.214 BSC		5.44 BSC	
N	3		3	
L	.780	.800	19.81	20.32
L1	.161	.173	4.10	4.40
ØP	.138	.144	3.51	3.65
Q	.216	.236	5.49	6.00
S	.238	.248	6.04	6.30

**E 55/28/21**

**Core**

**B66335**

- To IEC 61246
- Delivery mode: single units

**Magnetic characteristics (per set)**

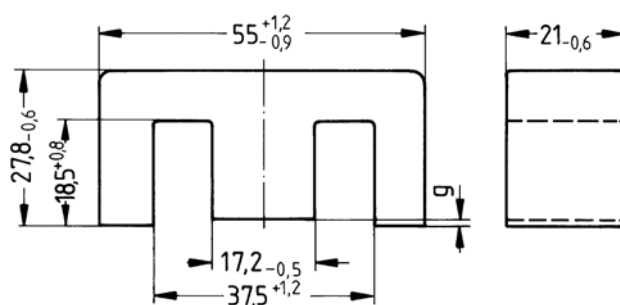
$\Sigma l/A = 0.35 \text{ mm}^{-1}$

$l_e = 124 \text{ mm}$

$A_e = 354 \text{ mm}^2$

$A_{min} = 351 \text{ mm}^2$

$V_e = 43900 \text{ mm}^3$



FEK0142-Y

**Approx. weight 215 g/set**

**Ungapped**

Material	$A_L$ value nH	$\mu_e$	$B_S^*$ mT	$P_V$ W/set	Ordering code
N27	5800 +30/-20%	1610	320	< 8.00 (200 mT, 25 kHz, 100 °C)	B66335G0000X127
N87	6400 +30/-20%	1780	320	< 3.80 (100 mT, 100 kHz, 100 °C)	B66335G0000X187
N97	6700 +30/-20%	1868	320	< 3.34 (100 mT, 100 kHz, 100 °C)	B66335G0000X197

\*  $H = 250 \text{ A/m}$ ;  $f = 10 \text{ kHz}$ ;  $T = 100 \text{ °C}$

**Gapped**

Material	g	$A_L$ value approx. nH	$\mu_e$	Ordering code ** = 27 (N27) = 87 (N87)
	mm			
N27, N87	0.50 ±0.05	843	234	B66335G0500X1**
	1.00 ±0.05	496	138	B66335G1000X1**
	1.50 ±0.05	364	101	B66335G1500X1**
	2.00 ±0.05	292	81	B66335G2000X1**

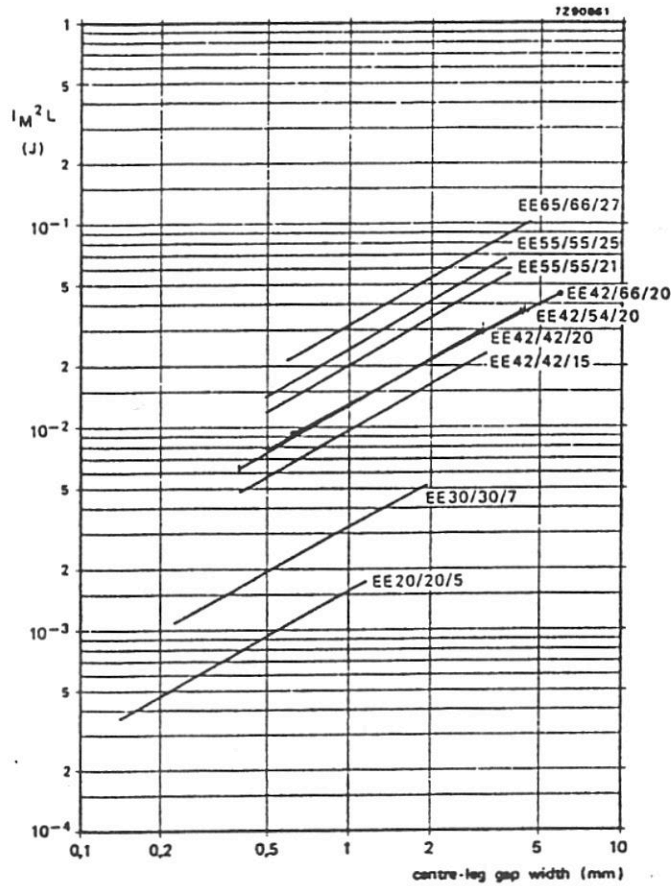
The  $A_L$  value in the table applies to a core set comprising one ungapped core (dimension  $g = 0$ ) and one gapped core (dimension  $g > 0$ ).

**Calculation factors** (for formulas, see “E cores: general information”)

Material	Relationship between air gap – $A_L$ value		Calculation of saturation current			
	K1 (25 °C)	K2 (25 °C)	K3 (25 °C)	K4 (25 °C)	K3 (100 °C)	K4 (100 °C)
N27	496	-0.764	836	-0.847	781	-0.865
N87	496	-0.764	800	-0.796	765	-0.873

Validity range: K1, K2:  $0.15 \text{ mm} < s < 3.50 \text{ mm}$   
K3, K4:  $180 \text{ nH} < A_L < 1799 \text{ nH}$





Kuva 11.8. Eräs kuristinsydänten valintakäyrästä /11/.

tarvitaan, jottei sydän kyllästyisi. Itse asiassa suurin osa kuristimen varastoimasta energiasta on varastoitunut juuri ilmarakoon. Kuristimen magneettinen sydän toimii lähinnä vuon ohjaajana, jolloin haitallinen hajavuo ympäristössä pienenee. Ilmaväli vaikuttaa luonnollisestikin kierrosmäärään, joka tarvitaan tietyn induktanssin aikaansaamiseksi. Mitä enemmän ilmarakoa, sitä enemmän kierroksia. Teoreettisemmin

$$L = \frac{N \phi}{I} \quad (11.18)$$

$$\phi = \frac{\mu_0 N I}{\frac{l_g}{A_g} + \sum \frac{l_m}{\mu A_m}} \approx \frac{\mu_0 N I}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{l_e - l_g}{\mu A_e}} \approx \frac{\mu_0 N I}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{C_1}{\mu}} \quad (11.19)$$

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{C_1}{\mu}} = \frac{\mu_0 \mu_e N^2 A_e}{l_e} = A_L N^2 \quad (11.20)$$

jossa  $l_g$  ja  $A_g$  ovat ilmavälin pituus ja pinta-ala sekä  $l_e$  ja  $A_e$  ovat efektiivinen magneettipiirin pituus ja pinta-ala.  $\mu_0$  on tyhjän (=  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m) ja  $\mu_e$  ilmavälin sisältävän sydämen efektiivinen permeabiliteetti ja  $C_1$  on sydänvakio.  $A_L$  on induktanssikerroin sydämelle tällä ilmavälillä.

Teht. 1-3: Katso kirja

Teht. 4

Johtohäviöt

Kuvasta 2 saadaan  $T_J = 125^\circ\text{C}$  lämpötilassa 25A virralla kun  $V_{GS} = 20\text{V}$

$$V_{DS} \approx 2.6\text{V}$$

$$\text{Siten } \underline{E_{HON}} = V_{DS} \cdot I_D \cdot t_{ON} \approx 2.6\text{V} \cdot 25\text{A} \cdot 20\mu\text{s} \\ \approx 1.3\text{mJ}$$

Päällekytkentähäviöt saadaan kuvasta 7

$$T_J = 125^\circ\text{C}, R_G = 11.8\Omega (=6.8\Omega + 5\Omega)$$

$$E_{HON} \approx 420\mu\text{J}$$

Tämä on kuitenkin jännitteellä 800V ja 20A virralla

Oletetaan, että näitä voidaan skaalata lineaarisesti

$$\text{Siten } \underline{E_{HON}} = 420\mu\text{J} \cdot \frac{600\text{V}}{800\text{V}} \cdot \frac{25\text{A}}{20\text{A}} \approx 390\mu\text{J}$$

Katkaisuhäviöt saadaan vastaavasti kuvasta 8

$$E_{HOFF} \approx 330\mu\text{J}$$

Tämän skaalaus 25A:lle (jännite on 800V katkaisussa)

$$E_{HOFF} \approx 330\mu\text{J} \cdot \frac{25\text{A}}{20\text{A}} \approx 410\mu\text{J}$$

Tentti 2015-03-09 Ratkaisut

Teht. 4 jatkoa

Oletetaan, että hilan lataus- ja purkaushäviöt sisältyvät  $E_{HON}$  ja  $E_{HTON}$  arvoihin. Siten keskimääräiset häviöt ovat

$$P_{H\text{ave}} = \frac{1}{T} (E_{HON} + E_{HTON} + E_{HTOFF})$$

$$\approx \frac{1}{40\mu\text{s}} (1300\mu\text{J} + 390\mu\text{J} + 410\mu\text{J})$$

$$\approx 53\text{ W}$$

Taajuus on  $\frac{1}{40\mu\text{s}} = 25\text{ kHz}$  eli reilusti yli  $1\text{ kHz}$

Siten lämpölaskut voidaan tehdä keskimääräisellä häviöteholla ja pysyvän tilan lämpövastuksella

$$T_{J\text{max}} \geq P_{H\text{ave}} (R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA}) + T_A$$

Siten jäähtyselementin lämpövastuksen on oltava

$$\underline{\underline{R_{th SA}}} \leq \frac{T_{J\text{max}} - P_{H\text{ave}} (R_{\theta JC} + R_{\theta CS}) - T_A}{P_{H\text{ave}}}$$

$$\approx \frac{125^\circ\text{C} - 53\text{ W} (0.58^\circ\text{C/W} + 0.25^\circ\text{C/W}) - 45^\circ\text{C}}{53\text{ W}}$$

$$\approx \underline{\underline{0,68^\circ\text{C/W}}}$$

Teht. 5

Kuristimen maksimivirta

$$I_{\max} = I_0 + \frac{1}{2} \Delta I_{p-p} = 44 \text{ A} + \frac{1}{2} 2.2 \text{ A} \approx 45.1 \text{ A}$$

Kirjan kuvaan 11.8 tarvitaan arvo

$$I_{\max}^2 \cdot L = (45.1 \text{ A})^2 \cdot 14 \mu\text{H} \approx 0.028 \text{ VAs}$$

Tällä luetaan E55/55/21 sydämen käyrältä

$$l_g \approx 1.3 \text{ mm}$$

Datalehdessä nähdään, että seuraava vakiorako

on 1,5 mm, jota vastaa induktanssikerroin  $A_L = 364 \text{ nH}$ 

$$L = A_L N^2 \text{ joten } N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{14 \mu\text{H}}{364 \text{ nH}}} \approx 6.2$$

Valitaan seuraavaksi suurempi kokonaisluku, eli  $N = 7$ 

$$\text{Nyt } L = A_L N^2 = 0.364 \mu\text{H} \cdot 7^2 \approx 17.8 \mu\text{H}$$

$$\text{Vuontiheys } B = \frac{\Phi}{A_e} = \frac{LI}{NA_e} = \frac{17.8 \mu\text{H} \cdot 45.1 \text{ A}}{7 \cdot 0.000354 \text{ m}^2} \\ = 323 \text{ mT}$$

Tämä on suunnilleen sydämen maksimivuontiheys 320 mT joten sydän voi olla jo kyllästynyt merkittävästi ja induktanssi ei olekaan tarpeeksi iso.

Voisi olla syytä valita isompi sydän tai isompi ilmaväli (siis 2 mm), jolla mitoitus olisi

$$N = \sqrt{\frac{14 \mu\text{H}}{0.292}} = 6.9 \Rightarrow N = 7 \quad L = 0.292 \cdot 7^2 = 14.3 \mu\text{H}$$

$$B_{\max} = \frac{14.3 \mu\text{H} \cdot 45.1 \text{ A}}{7 \cdot 0.000354 \text{ m}^2} \approx 260 \text{ mT}$$